

# 嫉妬による制裁の効率性が協調進化に与える影響

松澤遼<sup>1</sup>, 谷本潤<sup>2</sup>, 福田枝里子<sup>2</sup>, 萩島理<sup>2</sup>, 池谷直樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院 総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

<sup>2</sup>九州大学大学院 総合理工学府 環境共生工学部門

## 概要

人々は自分より利得の高いものに対して嫉妬心を抱く。嫉妬心に由来して他者を害する行動が人間社会の基盤である協調行動を促進するという報告を受けて、本論ではこうした制裁行動に支払われる労力とそれにより得られる効用のバランス、すなわち制裁行動の効率性に着目する。空間型囚人のジレンマゲームを用いた数値実験から、空間構造が正方格子の場合には、制裁行動の効用が大きいほど、また効率性が高いほど、協調が促進される。一方、スケールフリーネットワークの場合には、多大な労力を要するほど協調率が高くなるとの驚くべき結果を得た。

## Effect of sanction motivated by jealousy to enhance cooperation

Ryo Matsuzawa<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>1</sup>, Eriko Fukuda<sup>1</sup>, Aya Hagishima<sup>1</sup>, Naoki Ikegaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

People feel jealousy towards others who have higher payoff than oneself. Motivated by the previous report that harmful behavior stemming from jealousy makes cooperation grow, the present study considers the efficiency of sanctions, which implies the balance of the sanctioning cost and the damage. By a series of numerical simulations applying spatial prisoner's dilemma game, in case of the lattice population, larger damage of sanction and higher efficiency bring robust cooperation. Meanwhile, in case of scale-free population, interesting result that the larger cost makes cooperation level rise can be seen.

## 1 緒言

人間社会において、協調行動は公共財を維持するための極めて重要な社会基盤である。ダーウィンの進化論を振り返れば、人々の行動原理は協調よりもむしろ競争によってもたらされてきた。にもかかわらず、協調行動が普遍的に観測される事実と共に、「なぜ人は協調するのか」を明らかにすることは進化生物学や社会科学における長く続いている挑戦の一つである。近年、協調を促進するとの意味合いで大きく成功したメカニズムが加罰行動である[1]。一般的な加罰行動の枠組みには、個人が個人に対して直接的に罰を課す Peer-punishment[2] と、組織を通じて罰を課す Pool-punishment[3]がある。どちらにも共通して言えることは、非協調行動をとる相手に対し、加罰者は一定のコストを負担して罰を与えることにより、非協調行動を抑制できることである。しかしながら、有償で行われる加罰行動は、非協調者のみならず加罰者の利得をも低下させてしまうために、社会利得を低下させる要因となってしまう。それゆえ、加罰行動について考える際には、協調の進化だけでなく社会利得も同様に考慮しなければならない。

加罰行動に関する研究の中には、個々の感情に着目したものがある。例えば、加罰行動は非協調に対する怒りや嫌悪、反感などのネガティブな感情に基づいて行われることが検証されている[2, 4]。中でも、利得の不平等に対する反感が強く影響していることが実験的に示されている[5]。これに関連して、Ohdaira[6]は加罰行動に類似した新しいオプションとして“嫉妬による制裁 (Sanction with jealousy)”を提案している。各主体 (エージェント) の行動が非協調であるか否かを問わ

ず、自分より利得の高い相手に対して、その利得差により決まる確率で相手の足を引っ張るかどうかを決定する。高い利得を得た相手への嫉妬心から、多少の労を厭わず相手の利得を低下させようとする行動に着目している。結果として、利得が高くなりやすい非協調者の利得を低下させる一方で、協調者間では互いに利得を創出することにより、協調の促進および社会利得の向上に効果的であることを示した。

しかしながら、まだまだ検討の余地がある。例えば、制裁者が支払った労力の割に、相手の利得を下げる事ができずあまり効果が得られない場合があるかもしれない。反対に、少しの労力で大きな効用を上げることができる場合もありえるだろう。そこで本論では、Ohdaira[6]をベースにより一般性の高いモデルに拡張し、空間型囚人のジレンマ (Spatial prisoner's dilemma, SPD) ゲームを用いて、嫉妬による制裁行動の重要なパラメータであるコスト性や制裁レベルを様々変えることで、協調進化にどのような影響があるかを検討する。

## 2 モデル

### 2.1 2×2 ゲーム

本論では2×2のPDゲームを取り扱う。2×2ゲームでは、エージェントは協調 (Cooperation: C) か裏切り (Defection: D) のいずれかの戦略を持ち、自他の取る戦略の組み合わせにより、互いの利得が決まる。自分と相手が共にC戦略を選択した場合、両者はReward (R) を、共にD戦略を選択した場合にはPunishment (P) を得る。また、自身の戦略がC、相手の戦略がDの場合、自身はSucker (S) を相手はTemptation (T) を得る。ここで、著者らの既往研究に倣い、 $R=1, P=0$

に固定し、ジレンマ強さのパラメータ  $D_g=T-R$ ,  $D_r=P-S$  を導入して、利得行列のパラメータを再定義する[7].

$$\begin{matrix} & C & D \\ C & \begin{pmatrix} R & S \\ T & P \end{pmatrix} \\ D & \begin{pmatrix} C & D \\ 1+D_g & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1).$$

ここで  $D_g$ ,  $D_r$  はそれぞれ Chicken 型のジレンマ, Stag Hunt 型のジレンマを意味する. 本論では, 両ジレンマが正の値 ( $D_g, D_r \in [0, 1]$ ) をとる PD ゲームを考察対象とする.

## 2.2 シミュレーション方法

エージェント数は  $N=10000$  とする. 空間構造には, 次数  $k=8$  の二次元正方格子 (2D-Lattice) と平均次数  $\langle k \rangle = 8$  の Barabási-Albert モデルによるスケールフリーネットワーク (BA-SF) [8] の 2 つを用いる.

初期状態において, 全てのエージェントはネットワーク上のノードに配置され, 等しい割合で C, D 戦略が割り当てられる. エージェントは各時間ステップにリンクでつながれた隣人とゲームを行い, 行列(1)に示される利得を獲得する. ここで獲得した利得は他者から観測可能であり, 直接比較できる状況を想定している. 次に, ネットワーク上の隣人と利得を比較して, 制裁を与えるか否かを決定する. 相手の利得  $\pi_j$  が自分の利得  $\pi_i$  よりわずかに大きければ (本論では  $\pi_i < \pi_j < 2\pi_i$ ), 両者の利得差により決まる確率  $(\pi_i - \pi_j) / \pi_i$  で制裁行動を取る. その場合, 自身の利得の一部をコストとして支払い, 相手にペナルティを課す. 制裁行動を発動する上限 ( $2\pi_i$ ) を設けている意図は, 自己利得からあまりに乖離した富裕者には嫉妬感情をそもそも抱きがたいとの仮定に依る. ここで, 制裁の効果性について考えるために, 制裁者  $i$  の利得を一つの基準とすると, コスト係数  $c_s$  とペナルティ係数  $p$  を用いて両者の利得は次のように書き換えられる.

$$\begin{aligned} \pi'_i &= (1 - c_s) \pi_i \\ \pi'_j &= \pi_j - p \pi_i \end{aligned} \quad (2).$$

この時, 制裁の効果性は 2 つの設定パラメータを用いて,  $\beta = p/c_s$  で与えられる ([6]は  $\beta=1$  で固定). すなわち, (2)式は自己利得の一部を割いてでも, その  $\beta$  倍の制裁を加えることを意味する. 制裁行動は隣人全員を対象として, 各時間ステップで隣人全員を参照する. その後, 自身が獲得した利得と隣人の獲得利得をもとに自己の戦略を再考し, 戦略適応を行う. 本論では適応方法として, 自身を含めた隣人中で最高利得を獲得したエージェントの戦略を模倣する Imitation Max (IM) を用いる (但し, 最高利得の獲得者が複数いる場合はその中から, ランダムにコピー元を決定する). 戦略更新はシンクロに行う. ゲーム対戦および戦略適応を繰り返すことによって集団全体の協調率, すなわちエージェント総数に対する C 戦略の割合は毎時間ステップ更新される. 以上のプロセスは, グローバル協調率が疑似均衡に達するまで繰り返される.

グローバル協調率が摂動し続ける場合には, 繰り返し時間の上限を 10000 時間ステップとし, 最後の 100 時間ステップを平均することによって均衡協調率を得

ることとする. 以上に示す一連の試行を独立に 100 回を行い, その平均を結果とする.

## 3 結果および考察

嫉妬による制裁行動が協調を創発する可能性を評価するために, このセクションでは制裁行動に係るコストおよびペナルティを様々変えながらシミュレーションすることにより, 制裁行動の効率性が協調の進化にどのような影響をもたらすのか, またどのようなプロセスを経て協調に至るのかを考察する.

図 1 は, 制裁行動に係る効率性  $\beta$  とペナルティ係数  $p$  に対する平均協調率  $P_c$  を示している. 各格子点の値 (コンターの色) は, PD ( $D_g, D_r \in [0, 1]$ ) の領域で 0.1 刻みにアンサンブル平均協調率を取得し, 計 121 プロットから平均を取るにより得られる  $D_g, D_r \in [0, 1]$  領域における平均協調率である. 図 1(A) の 2D-Lattice を用いたケースでは, 通常の SPD ゲームの結果 (制裁無;  $p=0$ ,  $c_s=0$  の結果) と比較して, 制裁のコスト負荷が小さく効果性が大きくなるほど協調は促進される. また, 相手の利得をどれだけ引き下げるかに直結する  $p$  に対して強い感度を示しており,  $p$  が大きいほど協調率は高くなる. これらの結果は, 嫉妬による制裁が効率的であるほど協調が強化されることを示唆する. 一方で, 図 1(B) の BA-SF を用いたケースを見ると, 大きな差異ではないが, 効果性  $\beta$  が小さいほど協調率が高くなるという 2D-Lattice の場合とは反対の結果が示されている. 以下では, なぜこのような反対の傾向が表れるのか. BA-SF 上での協調進化のプロセスを明らかにすると共に, なぜ制裁行動の効率性  $\beta$  が悪いほど協調を促進するのかを検討する.

BA-SF のように次数が不均一であるネットワーク上でのゲームでは隣人を多く有する高次数者 (ハブ) の存在が戦略の伝播において重要な役割を持つ. 初期協調率 0.5 を前提としてネットワークに BA-SF, 戦略更新ルールに IM を組み合わせると, 初期に高い利得を得たハブにいる D によって集団全体に D 戦略が蔓延してしまい, C 戦略は容易に淘汰されてしまう (図 1(B) の  $p=0$  の領域). 一方で, C が高い利得を獲得したときにはハブを介して隅々まで C 戦略が行き渡り, 高位の協調率を達成し得る. 図 2 の協調率の時系列を見ると, その傾向が鮮明に表れている. 制裁行動を考慮しない場合 (図 2(A)), 初期にハブ C が好成績を上げな

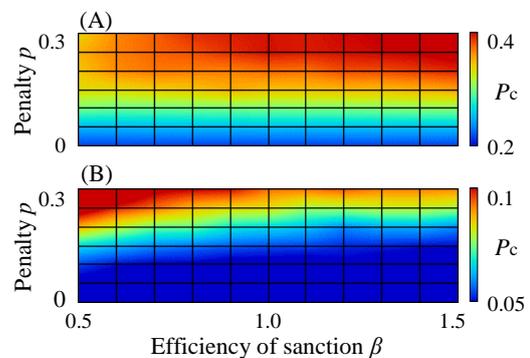


図 1 制裁の効率性  $\beta$  及びペナルティ係数  $p$  に対する PD 全域平均協調率  $P_c$ . 空間構造はそれぞれ (A) 2D-Lattice, (B) BA-SF.

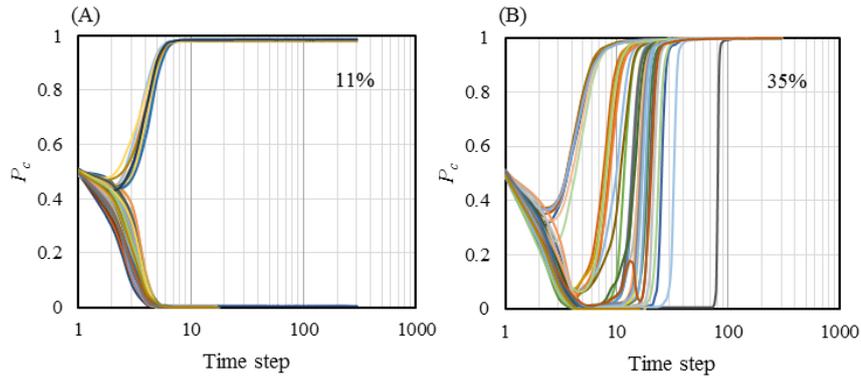


図2 BA-SFを用いて100回試行したときの協調率の時系列. 設定パラメータは $D_g=0.5, D_r=0, p=0.2$ , (A) Default (制裁無し). (B)  $\beta=1.0$ . グラフ中の百分率は高位の協調へ到達する割合.

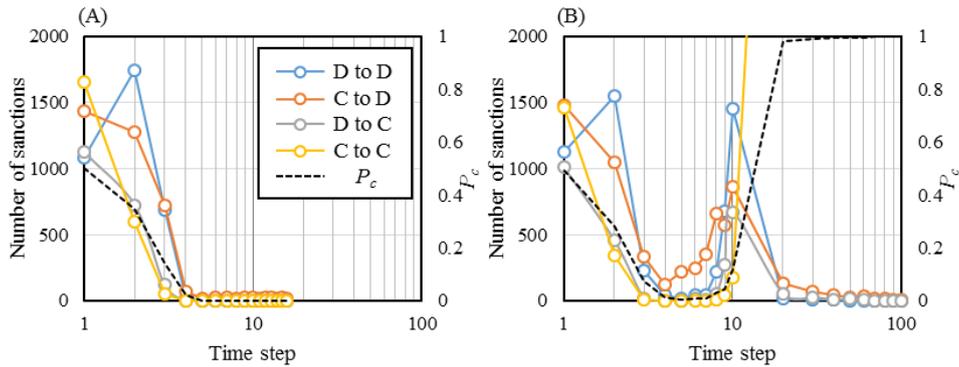


図3 代表的なエピソードにおけるタイプ別制裁回数と協調率の時系列. 設定パラメータは $D_g=0.5, D_r=0, p=2, \beta=1$ とした. (A) 協調が全滅するケース, (B) 協調が促進されるケース.

れば生存することができない. 反対に, 制裁行動を考慮した場合 (図2(B))には, 一度Dの猛攻を受けて協調率が著しく低下しても, 最終的には高い協調率を達成するエピソードが多い. つまり, 制裁行動の導入が, エピソード前半ではCの生存に優位に働き, 後半ではCの拡大に貢献していることが予想される. 制裁行動の役割について詳細に見てみる.

図3に4種類 (D→D, C→D, D→C, C→C; 制裁発動者→被制裁者) の制裁行動の時系列変化を示している. 図3(A), (B)を見ると, どちらも協調率が減少する過程は同じように見える. エピソード頭期には, ランダムな配置から互いに競争して利得を取ることによって制裁行動が頻発し, 協調者を起点とするC→D, C→Cの制裁行動が多くを占めている. 2ステップ目にはCを食って高い利得を得たDによってD戦略が広がり, 協調率が低下する. これにより, Dが嫉妬の対象となる. それでもなお, ケース(A)の場合にはDの拡大を抑えることができず, 全員がDになってしまう. しかしながら, ケース(B)の場合にはそうならない. これは何故か? ケース(B)を深く掘り下げてみよう. 図4に協調率が最低となる時点 ( $t=6$ ) での各種次数分布を示している.  $t=6$ すなわち初期のDがCを侵襲する期間の終期時点で, 中程度の次数のCの中には小規模な協調クラスターを形成して互いに協調し合うことで高利得を獲得し, 勝ち残る者がいる (図4(A)). また各エージェントの制裁状況を示した図4(B)によると, 中低次数の協調者は周辺にいる自分より次数の高いDに対して制裁を加えている. 反対に制裁の被害状況について見て

みると (図4(C)), 比較的高次数のDほど多くの制裁を被っている. 図4(D)にどの次数帯のエージェントからどの次数帯のDへ制裁がなされたかを示しているが, これによると比較的高次数のDはC隣人から食らうだけでなく, 自分よりやや次数の低いD隣人からも加えられている. ここで, 重要な点は制裁のコスト負担が大きいほど, Dが隣人のハブDを制裁することによる自利得低下が著しくなり, 自らが次数の低いC隣人の協調をコピーする可能性を生んでしまう. 以上により, Dの侵襲期を生き残ったCクラスターはDの攻勢を防ぐだけでなく, 隣接するDの利得の上回ったところから徐々に協調が広がっていき, ハブをC戦略にしたところで全体に協調が広がっていく. つまり, BA-SF上での協調進化において嫉妬による制裁行動は, Cの生存をより強固なものにし, 隣接するDの利得を低下させる (このDが高次数の隣接Dを制裁するから) ことでCの拡大を容易にしたと言える. ただし, 図3(B)で協調の拡大に伴って, C→Cの制裁行動が急速に増加しており, 全体が協調的になったにもかかわらず, 社会利得があまり大きくならないことも注目に値する. 裏切りの駆逐に成功し殆どが協調者で構成されていても, 次数分布に起因する収入差により, 嫉妬による制裁が繰り返されている状況は必ずしも効率的社会とはいえない.

前パラグラフで若干触れたが, なぜ制裁行動のコスト負担が大きい (効率性が低い) ほど協調が促進されるのかは, DがDに嫉妬するからである. 次数の不均一なBA-SFでは, 次数が高いほど利得が高くなりやす

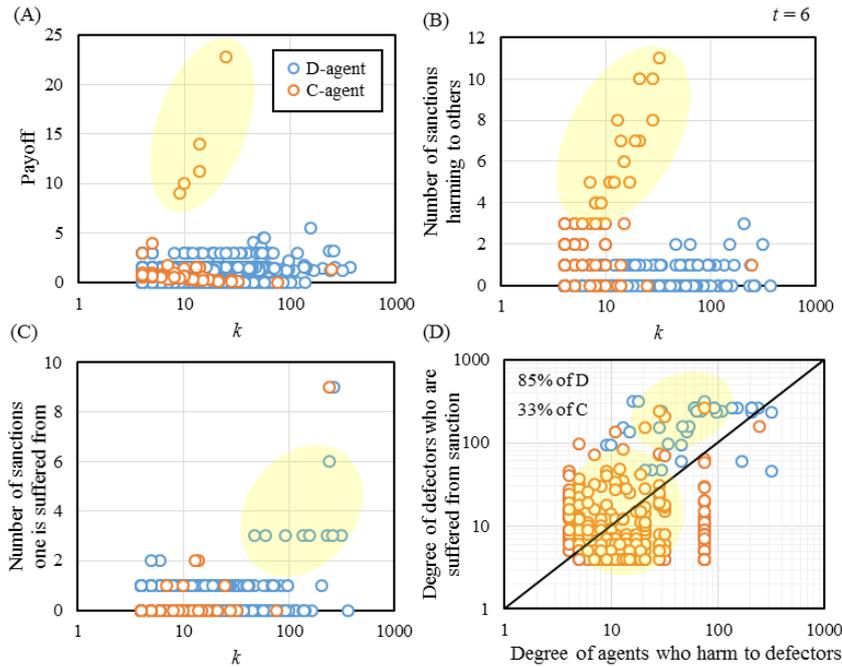


図4 図3(B)において協調率が最低の時 ( $t = 6$ )の各種度数分布. 設定パラメータは図3と同様,  $D_g = 0.5$ ,  $D_r = 0$ ,  $p = 2$ ,  $\beta = 1$ とした. (A) 利得 (ハイライト: クラスターを形成し, 高利得を獲得した協調者), (B) 度数  $k$  のあるエージェントが他者に制裁した回数 (ハイライト: 中低度数の協調者ほど積極的に制裁を課す), (C) 度数  $k$  のあるエージェントが他者から制裁された回数 (ハイライト: 高度数ほど制裁されやすい傾向がある). (D) あるエージェントから D への制裁の度数分布. 図中の百分率は自分より度数の高い D への制裁が占める割合. (ハイライト: C は比較的広い度数帯の D に制裁を課すが, D は自分より度数の高い D に制裁を課す)

く, D の侵襲期に協調クラスターをうまく形成した C を除けば, D の方が C よりも利得が高い傾向にある. すると, 図4(D)に見られるように中程度~低度数の D は自分より高利得のハブ的 D に制裁する一方で, C から制裁されてしまう. この時, 利得が低くなった者から C へと移り, 度数の低いところから C が増えていくこととなる. まとめて, コスト負荷が大きくなるほどハブに制裁している D の負担が大きくなるため, 末端で生存している C をコピーしやすくなり C が隣接する D に勝りやすくなるからである.

#### 4 結語

本論では, 自分よりも利得の高い相手に対して嫉妬心を抱き, その者の利得を下げようとする行動“嫉妬による制裁 (Sanction with jealousy)”に着目した. 多大な労力に反して制裁がうまくいかない場合や, 低コストで相手に大きなダメージをもたらす場合など様々なケースを想定した数値実験を行い, 制裁行動の効率性が協調進化に及ぼす影響を検討した. その結果, 空間構造が正方格子の場合には, 大きな損害を与えられるほどに, またコスト負荷が小さく効率性が高いほど, 協調が促進される. 一方で, 空間構造に度数分布のあるスケールフリーネットワークの場合には, 面白いことにコスト負荷が大きく, 制裁の効率性が低いほど協調を促進することが分かった. 両方の空間構造に共通して, 相手の利得をどれだけ引き下げることができるかが, 大きくは協調進化を左右する. スケールフリーネットワーク上の嫉妬制裁の有用性について協調進化

のプロセスを詳細に観ると, 協調者からの, また非協調者からの制裁が非協調者の利得を引き下げ, 協調クラスターに隣接する非協調者の C 化をもたらし, これがトリガーとなって高度数の非協調者をも C 化していく連鎖プロセスを生むことが明らかとなった.

更なる検討項目として, 今回は個人から個人への嫉妬を対象としたが, 枠組みを拡張して集団から個人への嫉妬制裁を考えることにより, 利得の不平等に起因する集団的行動が協調進化に与える影響を検討すること考えられる.

#### 謝辞

本研究の一部は科研費・萌芽研究 (#15K14077) による. 記して謝意を表す.

#### 参考文献

- [1] Sigmund, K., Hauert, C., Nowak, M.A., *PNAS* **98**, 10757-10762 (2001).
- [2] Fehr, E., Gächter, S., *Nature* **415**, 137-140 (2002).
- [3] Sigmund, K., Silva, H.D., Traulsen, A., Hauert, C., *Nature* **466**, 861-863 (2010).
- [4] Cubitt, R.P., Drouvelis, M., Gächter, S., *Experimental economics*, **14**, 254-272 (2011).
- [5] Raihani, N.J., McAuliffe, K., *Biology letters* **8**, 802-804 (2012).
- [6] Ohdaira, T., *Journal of Information Processing* **24**, 534-539 (2016).
- [7] Tanimoto, J., Sagara, H., *BioSystems* **90**(1) 105-114 (2007).
- [8] Barabási, A.L., Albert, R., *Science* **286**, 509-512 (1999).